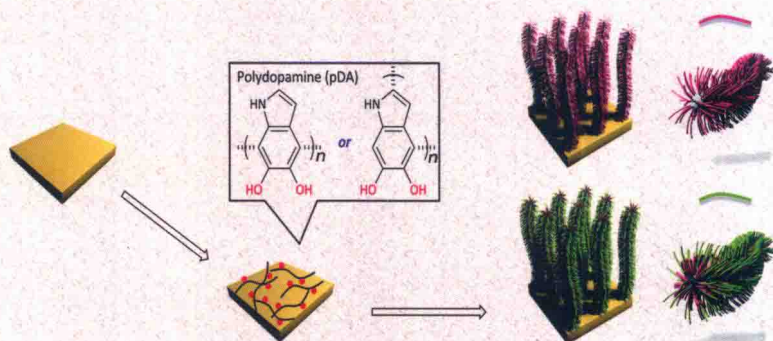
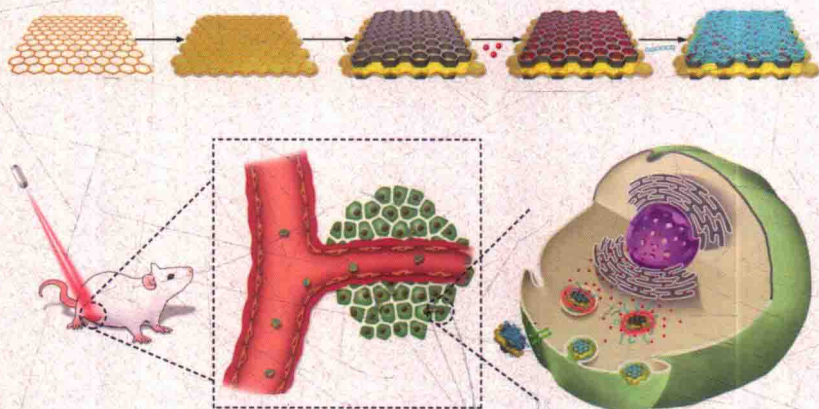




多巴胺基微纳米材料在 生物医药中的应用

李 红◎著



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

多巴胺基微纳米材料在 生物医药中的应用

李红 著

中國石化出版社

内 容 提 要

本书对多巴胺基微纳米材料在生物医药中的应用作了较为全面的总结。从介绍神经递质多巴胺分子的基本特性开始,进而阐述受贻贝黏附蛋白启发以多巴胺为前驱体制备聚多巴胺的机理及其影响因素;然后分别介绍几种典型多巴胺基微纳米材料的构建方法与调控策略,包括聚多巴胺纳米粒子、核/壳结构、微胶囊、聚多巴胺薄膜等;最后,重点探讨多巴胺基微纳米材料在疾病检测、生物成像、药物输送、光热疗法、组织工程和抗菌等生物医药领域中的应用进展。

本书可作为化学、材料、医学以及生命科学等相关专业科研人员的参考用书,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

多巴胺基微纳米材料在生物医药中的应用 / 李红著.
—北京:中国石化出版社, 2018. 7
ISBN 978-7-5114-4964-1

I. ①多… II. ①李… III. ①纳米材料-应用-生物
医学工程 IV. ①R318

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 162410 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号

邮编:100020 电话:(010)59964500

发行部电话:(010)59964526

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

710×1000 毫米 16 开本 9 印张 169 千字

2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

定价:48.00 元

前言

分子仿生的理念为微纳米材料的构建提供了无限的创新发展空间。多巴胺是存在于中枢神经系统中的儿茶酚胺类神经递质。通过仿贻贝黏附蛋白发现,多巴胺能够在碱性溶液中氧化自聚合生成聚多巴胺,而这种聚多巴胺材料几乎可以黏附在任意组成和形状的材料表面,并且具有很多独特的物理化学性质,引起了研究者们强烈的研究兴趣。

本书在概述神经递质多巴胺分子基本特性的基础上,介绍了多巴胺氧化自聚合反应制备聚多巴胺的反应机理及影响因素,集中阐述了以多巴胺为构筑基元制备微纳米材料的方法与调控策略,进而着重介绍了多巴胺基微纳米材料在生物医药中的应用,分别探讨其在生物传感、癌症治疗、组织工程和抗菌等领域中的多样性应用。

本书共分为4章。第1章介绍了多巴胺作为神经递质的生理作用机制及其对疾病的治疗,以多巴胺为构筑基元的微纳米材料的制备及未来发展所面临的挑战。第2章详细总结了通过仿贻贝黏附蛋白,利用多巴胺在碱性环境下氧化自聚合的反应制备聚多巴胺的反应机理及各种影响因素。第3章着重介绍了几种典型的多巴胺基微纳米材料的构建方法与调控策略,包括聚多巴胺纳米粒子、核/壳结构、微胶囊、聚多巴胺薄膜等。第4章重点阐述了多巴胺基微纳米材料在生物医药中的应用,详细探讨多巴胺基微纳米材料在疾病检测、生物成像、药物输送、光热疗法、组织工程和抗菌等生物医药领域中应用的典型实

例。在上述各章节内容的介绍中，引用了大量国际主流学术期刊的研究工作，尤其是生物医药领域内具有一定影响力的课题组的工作。在编写过程中，尽量遵从原文，避免过多的主观分析和推断，便于各位专家和读者进行独立的思考与判断，领悟研究工作本身的科学性和创造性。

本书的编写得到了中国科学院化学研究所李峻柏研究员的指导与关怀。十年前，有幸在李峻柏研究员的指导下，我接触到仿生纳米材料研究，在此向李峻柏研究员表示由衷的感谢。

感谢西安石油大学优秀学术著作出版基金资助出版，感谢国家自然科学基金项目(21703169)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JQ2047)和陕西省教育厅专项科研计划项目(17JK0600)资助，感谢石油石化污染物控制与处理国家重点实验室和陕西省油气田环境污染控制技术与储层保护重点实验室的大力支持。

作者力求将精准的各章节内容奉献给读者，但由于学识有限，加之时间仓促，书中难免有不当之处，敬请各位专家和读者批评指正。

1 概述	1
1.1 多巴胺简介	2
1.2 多巴胺基药物	3
1.3 多巴胺基微纳米材料简介	3
1.4 多巴胺微纳米材料的挑战与展望	6
参考文献	7
2 聚多巴胺形成的机理及影响因素	11
2.1 聚多巴胺形成的机理	12
2.1.1 共价键理论	12
2.1.2 非共价键理论	14
2.1.3 共价键与非共价键共同作用理论	16
2.2 聚多巴胺形成的影响因素	19
2.2.1 多巴胺的浓度	19
2.2.2 缓冲溶液的种类	20
2.2.3 缓冲溶液的 pH	20
2.2.4 反应时间	20
2.2.5 反应温度	22
2.2.6 氧化剂和酶	22
2.2.7 电聚合反应	23
参考文献	23

3 多巴胺基微纳米材料的制备	27
3.1 聚多巴胺纳米粒子	28
3.2 核/壳结构	30
3.3 微胶囊	31
3.4 聚多巴胺薄膜	34
3.5 其他材料	34
参考文献	37
4 多巴胺基微纳米材料的应用	43
4.1 在生物传感中的应用	44
4.1.1 癌胚抗原的检测	44
4.1.2 DNA/RNA 的检测	47
4.1.3 蛋白质的检测	50
4.1.4 尿中代谢物的检测	55
4.1.5 分子印迹技术	58
4.1.6 生物成像	61
4.2 在癌症治疗中的应用	65
4.2.1 在化疗中的应用	65
4.2.2 在光热疗法中的应用	75
4.2.3 在联合治疗中的应用	79
4.2.4 在诊疗一体化中的应用	87
4.3 在组织工程中的应用	97
4.3.1 聚多巴胺修饰基底上的细胞黏附行为	98
4.3.2 聚多巴胺辅助生物分子固定	100
4.3.3 聚多巴胺修饰基底上细胞黏附的空间调控	101
4.3.4 在软组织工程中的应用	103
4.3.5 在硬组织工程中的应用	106

4.4 在抗菌中的应用	107
4.4.1 聚多巴胺抗菌涂层	109
4.4.2 贵金属纳米粒子抗菌	110
4.4.3 蛋白质、多肽抗菌	114
4.4.4 其他应用	115
参考文献	116

▶ 1

概述

1.1 多巴胺简介

多巴胺(dopamine, DA)是中枢神经系统中主要的儿茶酚胺类神经递质。早在1910年多巴胺就已经被人工合成出来,但是直到1958年,瑞典科学家 Arvid Carlsson 首次提出了多巴胺是神经递质的概念,人们才逐渐认识到多巴胺在脑内的重要功能^[1]。作为一种内源性神经递质,多巴胺主要通过其受体调控椎体外系的运动功能、精神活动、垂体激素的分泌以及心血管功能。此外,多巴胺还参与胃肠道功能、眼内压和视网膜信息传递的调控。多巴胺递质通过多巴胺受体的介导,在尾状核、豆核、伏隔核区黑质及边缘系统中产生生理状态的“自我奖赏”驱动效应,如进食、性爱等需求满足的驱动,属于机体生存必须的神经生理调控系统^[2]。

多巴胺的不同作用均是因其特异受体介导的。1972年,科学家发现多巴胺能够刺激腺苷酸环化酶活性,从而证实了多巴胺受体的存在。Cools 和 Van Rossum 基于药理学和生物化学实验,于1976年提出多巴胺存在多个连接位点^[3]。1978年,Spano^[4]将多巴胺受体分为两类,一类能够激活腺苷酸环化酶,另一类不能够激活腺苷酸环化酶。此后,Kebabian 和 Calne^[5]把多巴胺受体分成 D1R 和 D2R 两类。并且,放射性配体连接研究也证实了 D1R 和 D2R 受体的存在及其与腺苷酸环化酶的不同偶联^[6]。目前,通过分子克隆技术已经鉴定出5种生理功能不同的多巴胺受体。多巴胺受体逐渐被细分为 D1R、D2R、D3R、D4R 和 D5R 等多种受体亚型。其中,D1R 和 D5R 受体亚型统称为 D1R 样受体;D2R、D3R 和 D4R 受体亚型统称为 D2R 样受体^[7]。多巴胺受体属于 G 蛋白偶联受体家族。这类受体的基本结构特征包括:有7次跨膜的蛋白结构;氨基端位于细胞外,羧基端位于细胞内;第三个胞内环上存在与 G 蛋白偶联的位点^[8]。

2000年诺贝尔生理学 and 医学奖授予了三位科学家,瑞典科学家 Arvid Carlsson、美国科学家 Paul Greengard 和 Eric Kandel,以表彰他们在研究“神经系统中信号传导”机理方面的突出贡献^[9]。其中,Arvid Carlsson 研究发现多巴胺是神经递质,脑内多巴胺的缺乏会引起帕金森病(Parkinson's disease, PD)^[1]。而在此之前,人们普遍认为多巴胺只是另一种递质去甲肾上腺素(noradrenaline, NA 或 norepinephrine, NE)的前体。Arvid Carlsson 发明了一种高灵敏度的多巴胺测定方法,发现多巴胺在大脑中的含量高于去甲肾上腺素,尤其是集中在脑部基底核。而脑部基底核是控制运动机能的重要部位。因此,他得出结论:多巴胺本身即为一种神经递质。Arvid Carlsson 还开展了其他几项进一步的研究,确定了多巴胺在脑部中起到的重要作用,并指出精神分裂症可以通过药物进行有效的治疗。在此研究的基础上,Paul Greengard 揭示了多巴胺等神经递质在神经系统中

的作用机制,确定了突触是神经细胞间的联结。而 Eric Kandel 则发现了修饰突触效能的方法,以及其中涉及的分子机制。

1.2 多巴胺基药物

脑内多巴胺神经功能失调是帕金森病和精神分裂症(schizophrenia)的重要原因。中脑黑质多巴胺神经元变性在帕金森病的发生发展中起着重要作用,治疗该病可以通过使用多巴胺受体激动剂或多巴胺的前体——左旋多巴替代治疗,从而补偿内源性多巴胺的不足。边缘系统多巴胺通路的失衡被认为是精神分裂症等精神病的病因之一。治疗这类疾病临床上通常采用多巴胺受体拮抗剂。此外,多巴胺还具有兴奋心脏、增加肾血流量的功能,用于治疗缺血性、心源性及感染性休克等病症。

最近研究表明,多巴胺还能够控制癌症的生长和转移,例如胃癌^[10]、肝癌^[11]、卵巢癌^[12]、肺癌^[13]、乳腺癌^[14,15]等。多巴胺的抗肿瘤活性是通过其受体实现的。Borcherding 等^[15]发现在乳腺癌中能够表达多巴胺 D1R 受体,并且晚期乳腺癌及其不良预后与 D1R 受体的过表达相关。通过激活 D1R/cGMP/PKG 信号转导通路可以引发体外细胞凋亡以及体内肿瘤的退化。在胃癌中, D2R 受体能够抑制胰岛素样生长因子 I 引发的癌细胞增殖,并且通过 EGFR/AKT/MMP-13 信号转导通路抑制癌细胞的迁移和侵袭^[10]。活体和体外实验均证实了多巴胺通过 D2R 受体可以抑制肿瘤内皮细胞和骨髓内皮祖细胞中血管渗透因子与血管内皮生长因子的活性,从而抑制肿瘤的生长^[12,16,17]。此外,多巴胺抗血管生成及抑制血管成熟的作用使得儿茶酚胺类物质成为治疗脉管异常类癌症等疾病的新选择^[18]。

1.3 多巴胺基微纳米材料简介

贻贝(mussel)具有极强的黏附能力,在海洋中可以吸附在多种固体表面上,如海床、轮船底部等。科学家研究表明,贻贝分泌的黏附蛋白能够黏附在几乎所有的基底材料上,甚至包括聚四氟乙烯[图 1-1(a)]。并且这种天然黏附不存在合成黏合剂在水下或者潮湿环境中的黏结性能差的缺陷,因而备受关注^[19,20]。通过对贻贝足丝蛋白进行研究发现,其富含大量的 3,4-二羟基苯丙氨酸(3,4-dihydroxyphenylalanine, DOPA)这种分子结构[图 1-1(b)~图 1-1(d)]。3,4-二羟基苯丙氨酸中所包含的邻苯二酚基团具有很强的配位能力,能与金属形成可逆的有机金属配合物。而且,邻苯二酚基团被氧化形成醌后能与很多基团反应生成共价键。3,4-二羟基苯丙氨酸分子结构与被黏附基底间形成的多重共价及非共价相

互作用是贻贝黏附蛋白具有极强黏附能力的根本原因^[21]。

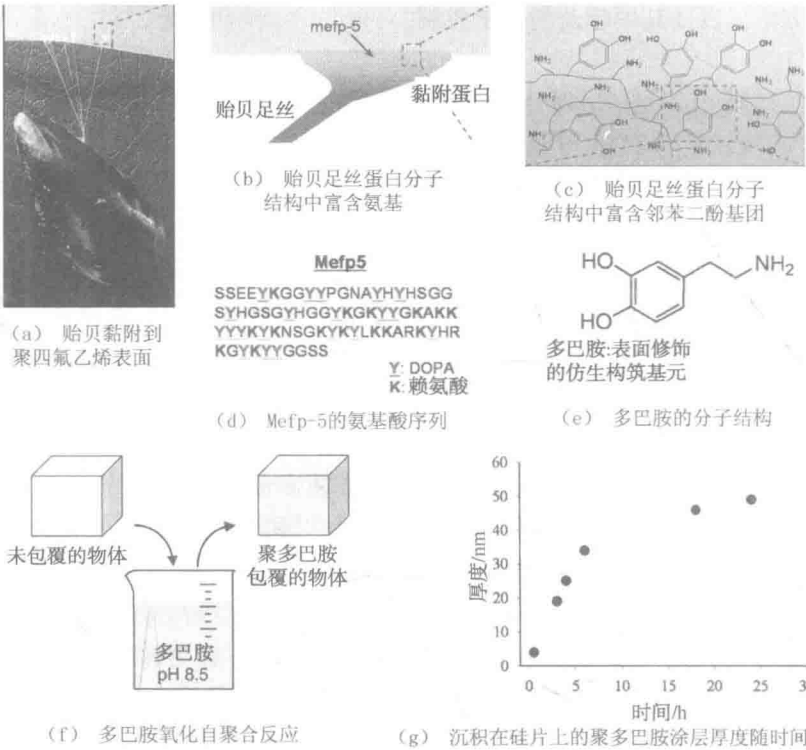


图 1-1 仿贻贝黏附蛋白结构,通过多巴胺的氧化自聚合反应制备聚多巴胺^[22]

科学家研究了贻贝黏附特性的秘密,并且模仿这种超强黏附特性应用于黏附材料的开发^[19,23]。考虑到贻贝黏附蛋白中除了3,4-二羟基苯丙氨酸组分,还含有大量的赖氨酸结构,Messersmith等^[22]认为若使材料可以黏附到任何表面上,邻苯二酚和氨基基团必须同时存在。因此,他们选择了同时具有邻苯二酚和氨基基团的小分子多巴胺作为仿贻贝黏附蛋白的前驱体,开发了新型基于贻贝的仿生材料[图1-1(e)]。2007年,Messersmith等将多巴胺溶解于10mM(mM表示mmol/L)的三羟甲基氨基甲烷-盐酸(Tris-HCl,pH=8.5)的缓冲液中,然后把各种不同基质(金属、金属氧化物、陶瓷材料、聚合物等)的材料浸渍在上述溶液中。在溶解氧气存在的条件下,溶液中的多巴胺发生氧化以及自聚合反应生成聚多巴胺(polydopamine,PDA),并且可以在任意组成和形状的材料表面形成一层聚多巴胺涂层[图1-1(f)、图1-1(g)]。这种聚多巴胺具有邻苯二酚、氨基等活性基团,可以进一步与含有氨基或巯基的分子发生迈克尔加成反应、席夫碱反应,或者与金属离子发生配位反应,从而对材料进行功能性修饰。因此,聚多巴胺在表面修饰领域显示出了卓越优势,近年来得到了快速的发展(图1-2)。

虽然,Messersmith等将多巴胺氧化聚合的产物称为聚多巴胺。GPC研究证

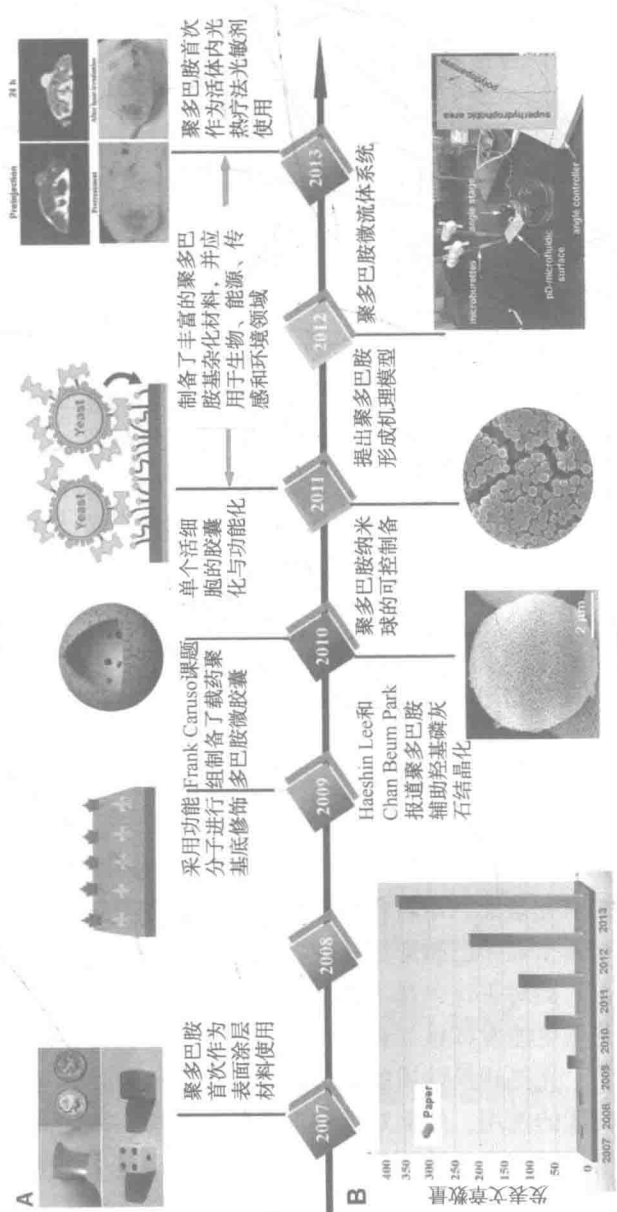


图1-2 聚多巴胺基材料研究的发展情况 [24]

明聚多巴胺中同时含有分子量高达几百万的组分以及分子量很小的寡聚物。然而, Waite 等^[25]认为相比仿贻贝黏附蛋白分子, 水溶液中多巴胺的氧化聚合过程更类似于真黑素(eumelanin)的生成。分子结构研究也表明, 通过多巴胺氧化自聚合反应生成的聚多巴胺中存在真黑素的前驱体 5,6-二羟基吲哚。真黑素是一种不规则的生物聚合物, 普遍存在于各种有机体的天然色素中^[26]。真黑素扮演着抗氧化剂、光保护剂的角色, 能够为机体阻止某些病原体的侵害提供免疫性。由于聚多巴胺与真黑素化学结构的相似性, 聚多巴胺也具有许多优良的性质, 例如良好的生物相容性、还原性、荧光猝灭性质以及光热转换性质等。尽管目前对于这种方法得到的涂层是聚合物还是类似真黑素的超分子结构仍然没有定论, 但是聚多巴胺仍然在材料的制备和修饰方面表现出了独特的优势, 被广泛应用于能源、传感、环境, 尤其是生物医药领域^[24,27,28]。

在对聚多巴胺研究的基础上, 科学家们进一步研究发现不仅可以通过加入其他功能性分子调控多巴胺的氧化自聚合反应, 而且还可以利用多巴胺分子与其他功能性分子的共组装制备具有新颖组成和形貌的微纳米结构。基于此, 研究者们构建了丰富多样的多巴胺基微纳米材料, 包括纳米颗粒、核/壳结构、微胶囊、薄膜等。这些微纳米材料由于具有易修饰性、生物相容性、荧光猝灭性质以及光热转换性质等卓越的性能, 在生物传感、药物输送、光热疗法、组织工程和抗菌等生物医药领域显示出很大的应用前景。过去的几年见证了多巴胺基微纳米材料在生物医药领域应用的飞速发展。目前, 已经有大量的文献和综述详细地介绍了多巴胺基微纳米材料在生物医药中的应用^[29-32]。

1.4 多巴胺微纳米材料的挑战与展望

多巴胺基微纳米材料在众多交叉领域, 包括化学、材料、医药以及生命科学, 都有十分重要的研究意义。尽管科学家们对多巴胺基微纳米材料的应用进行了丰富的拓展, 但是关于聚多巴胺形成机理及其组成的研究仍是众说纷纭, 缺乏一个有信服力的定论。而对于这个基本问题的深入理解, 将会进一步促进对其黏附性质的理解, 以开拓更能发挥该材料优势的应用领域。此外, 对于聚多巴胺所具有的荧光猝灭性质、光热转换性质的机理研究尚不明确。目前更多的研究工作则是关注于对上述性能的使用, 然而对性质形成的本质原因缺乏深入的探讨。

多巴胺基微纳米材料在生物医药领域的后续研究, 需要更加侧重于如何将该材料从实验室研究发展到临床应用。因此, 我们还面临以下挑战:

① 深入研究多巴胺基微纳米材料的生物相容性和毒性。多巴胺本身作为一种神经递质, 具有神经药物的作用以及抗癌的疗效。多巴胺基纳米材料的稳定性和生物降解性直接影响着多巴胺分子的体内释放, 从而对细胞和机体产生影响。

多巴胺分子对于机体的毒性仍需要进行系统的研究。

② 注重实现微纳米材料组装的精准调控, 包括对特殊尺度的控制、特殊功能的实现等。多巴胺与其他功能性分子的共组装有望丰富多巴胺基微纳米材料的结构与功能, 进而实现多巴胺分子的可控组装, 值得研究者们付出更多的努力以发现其中蕴含的规律。

③ 利用多巴胺基微纳米材料的多功能性构建诊疗一体化纳米平台, 发挥纳米材料的优越性。基于多巴胺基材料构建诊疗纳米平台, 能够整合生物成像、药物输送、可控释放、联合治疗等多种功能于一体, 为癌症等人类重大疾病的攻克带来了新的希望, 还需进行持久深入的研究。

总之, 多巴胺基微纳米材料由于具有制备简便、可修饰性强、多功能性、生物相容性等众多优点, 极大地促进了生物医药领域内各个研究方向的快速发展。尽管该项研究仍处于初级阶段, 对于临床应用的实现还需多方面的共同努力, 但是, 多巴胺基微纳米材料确实是为材料的表面修饰、癌症等重大疾病的治疗带来了新思路和新方法。目前, 多巴胺基微纳米材料的研究仍然是一个非常具有吸引力的研究方向, 研究者们需要更加努力致力于该项研究进而推动其在生产生活中的实际应用。

参 考 文 献

- [1] Carlsson A. , Lindqvist M. In-vivo decarboxylation of alpha-methyl dopa and alpha-methyl metatyrosine. *Acta Physiologica Scandinavica*, 1962, 54: 87-94.
- [2] 王宇, 于孝军, 李剑虹, 等. 多巴胺及其受体的研究进展. *黑龙江畜牧兽医*, 2003, (09): 67-68.
- [3] Cools A. R. , Van Rossum J. M. Excitation-mediating and inhibition-mediating dopamine-receptors: a new concept towards a better understanding of electrophysiological, biochemical, pharmacological, functional and clinical data. *Psychopharmacologia*, 1976, 45(3): 243-254.
- [4] Spano P. F. , Govoni S. , Trabucchi M. Studies on the pharmacological properties of dopamine receptors in various areas of the central nervous system. *Advances in Biochemical Psychopharmacology*, 1978, 49: 155-165.
- [5] Keibadian J. W. , Calne D. B. Multiple receptors for dopamine. *Nature*, 1979, 277 (5692): 93-96.
- [6] 王建. 中枢多巴胺受体的分子生物学研究进展. *国外医学(遗传学分册)*, 1998, 21(04): 188-191.
- [7] Grandy D. K. , Marchionni M. A. , Makam H. , et al. Cloning of the cDNA and gene for a human d2 dopamine receptor. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1989, 86(24): 9762-9766.
- [8] 金国章, 镇学初, 周嘉伟, 等. 脑内多巴胺. 上海: 上海科学技术出版社, 2010.
- [9] Gispén W. H. Nobel prize in physiology of medicine for year 2000 for research of signal transduc-

- tion in the nervous system. *Nederlands Tijdschrift Voor Geneeskunde*, 2000, 144 (46): 2184-2187.
- [10] Huang H. L. , Wu K. M. , Ma J. , et al. Dopamine D2 receptor suppresses gastric cancer cell invasion and migration via inhibition of EGFR/AKT/MMP-13 pathway. *International Immunopharmacology*, 2016, 39: 113-120.
- [11] Zhang Q. B. , Zhang B. H. , Zhang K. Z. , et al. Moderate swimming suppressed the growth and metastasis of the transplanted liver cancer in mice model: with reference to nervous system. *Oncogene*, 2016, 35(31): 4122-4131.
- [12] Moreno-Smith M. , Lu C. , Shahzad M. M. K. , et al. Dopamine blocks stress-mediated ovarian carcinoma growth. *Clinical Cancer Research*, 2011, 17(11): 3649-3659.
- [13] Ishibashi M. , Fujisawa M. , Furue H. , et al. Inhibition of growth of human small cell lung cancer by bromocriptine. *Cancer Research*, 1994, 54(13): 3442-3446.
- [14] Akbari M. E. , Kashani F. L. , Ahangari G. , et al. The effects of spiritual intervention and changes in dopamine receptor gene expression in breast cancer patients. *Breast Cancer*, 2016, 23(6): 893-901.
- [15] Borcherding D. C. , Tong W. , Hugo E. R. , et al. Expression and therapeutic targeting of dopamine receptor-1 (D1R) in breast cancer. *Oncogene*, 2016, 35(24): 3103-3113.
- [16] Chakroborty D. , Sarkar C. , Basu B. , et al. Catecholamines regulate tumor angiogenesis. *Cancer Research*, 2009, 69(9): 3727-3730.
- [17] Basu S. , Nagy J. A. , Pal S. , et al. The neurotransmitter dopamine inhibits angiogenesis induced by vascular permeability factor/vascular endothelial growth factor. *Nature Medicine*, 2001, 7(5): 569-574.
- [18] Moreno-Smith M. , Lee S. J. , Lu C. H. , et al. Biologic effects of dopamine on tumor vasculature in ovarian carcinoma. *Neoplasia*, 2013, 15(5): 502-510.
- [19] Waite J. H. , Tanzer M. L. Polyphenolic substance of mytilus-edulis-novel adhesive containing L-dopa and hydroxyproline. *Science*, 1981, 212(4498): 1038-1040.
- [20] 吴俊杰, 龙宇华, 赵宁, 等. 仿贻贝黏附高分子的研究进展. *高分子通报*, 2011, (10): 86-93.
- [21] Lin Q. , Gourdon D. , Sun C. , et al. Adhesion mechanisms of the mussel foot proteins mfp-1 and mfp-3. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(10): 3782-3786.
- [22] Lee H. , Dellatore S. M. , Miller W. M. , et al. Mussel-inspired surface chemistry for multi-functional coatings. *Science*, 2007, 318(5849): 426-430.
- [23] Harrington M. J. , Masic A. , Holten-Andersen N. , et al. Iron-clad fibers: a metal-based biological strategy for hard flexible coatings. *Science*, 2010, 328(5975): 216-220.
- [24] Liu Y. , Ai K. , Lu L. Polydopamine and its derivative materials: synthesis and promising applications in energy, environmental, and biomedical fields. *Chemical Reviews*, 2014, 114(9): 5057-5115.
- [25] Waite J. H. Mussel power. *Nature Materials*, 2008, 7: 8-9.
- [26] Lynge M. E. , van der Westen R. , Postma A. , et al. Polydopamine-a nature-inspired polymer

coating for biomedical science. *Nanoscale*, 2011, 3(12): 4916–4928.

- [27] Atta A. M. , El- Mahdy G. A. , Ismail H. S. , et al. Effects of water soluble rosin on the corrosion inhibition of carbon steel. *International Journal of Electrochemical Science*, 2012, 7 (7): 11834–11846.
- [28] Della Vecchia N. F. , Avolio R. , Alfà M. , et al. Building - block diversity in polydopamine underpins a multifunctional eumelanin - type platform tunable through a quinone control point. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(10): 1331–1340.
- [29] Li H. , Jia Y. , Peng H. , et al. Recent developments in dopamine-based materials for cancer diagnosis and therapy. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2018, 252: 1–20.
- [30] Batul R. , Tamanna T. , Khaliq A. , et al. Recent progress in the biomedical applications of polydopamine nanostructures. *Biomaterials Science*, 2017, 5(7): 1204–1229.
- [31] Perikamana S. K. M. , Lee J. , Lee Y. B. , et al. Materials from mussel-inspired chemistry for cell and tissue engineering applications. *Biomacromolecules*, 2015, 16(9): 2541–2555.
- [32] Liu M. Y. , Zeng G. J. , Wang K. , et al. Recent developments in polydopamine: an emerging soft matter for surface modification and biomedical applications. *Nanoscale*, 2016, 8 (38): 16819–16840.